

B-60 京都議定書吸収源としての森林機能評価に関する研究

(1) 森林の炭素吸収量計測システム・評価モデルの開発

3) 森林土壌の炭素吸収量評価モデルの開発

独立行政法人森林総合研究所

立地環境研究領域	領域長	高橋正通
	チーム長	森貞和仁
	土壌資源評価研究室	酒井佳美・橋本昌司
北海道支所	植物土壌系研究グループ	田中永晴・酒井寿夫
東北支所	森林環境研究グループ	小野賢二
四国支所	森林生態系変動グループ	稲垣善之

<研究協力者> アメリカ合衆国 コロラド州立大学 D.Ojima, B. Parton

平成14～18年度合計予算額 47,760千円
(うち、平成18年度予算額 9,854千円)

※上記の予算額には、間接経費 10,934千円を含む

[要旨] 本研究では気候変動枠組み条約や京都議定書報告書における土壌、リター、枯死木プールの炭素ストック推定方法を検討し、わが国に適した森林土壌の炭素吸収量評価モデルを開発した。まず初めに、既存の報告書や研究例を整理し各プールの炭素量を集計した。リターや枯死木プールの蓄積量と分解速度や森林土壌の平均炭素蓄積量(0-30cm深)が9.0kg/m²であること、また、それらの地域的な違いを明らかにした。次に、有機物の分解速度を決める化学成分を明らかにするため、広葉樹(ブナ)と針葉樹(アカマツ)落葉の分解に伴う有機化学組成の変化を分析し、セルロースやリグニンの分解がリターの分解速度を決める主要な成分であることを示した。これらの基礎情報と研究結果をもとに、森林の土壌・枯死有機物炭素モデルとして、国際的に著名なモデルからCENTURYモデルを選択し、日本の森林生態系への適合度の向上を検討した。CENTURYモデルは樹木バイオマス成長モデルを内包するので、土壌と枯死有機物だけでなく、収穫表と拡大係数による生体バイオマス予測とも適合するようモデルのパラメータを調整した。これにより条約や議定書報告で用いられる地上部・地下部バイオマス炭素予測結果とも連動した枯死木・リター・土壌炭素予測モデルが完成し、CENTURY-jfosモデルと命名した。CENTURY-jfosモデルを用い、土壌および枯死有機物の蓄積量や分解、伐採や間伐など森林施業による影響を解析した。京都議定書報告の森林の炭素吸収量算定にCENTURY-jfosモデルの結果が利用された。

[キーワード] 土壌有機物、リター、枯死木、森林施業、CENTURY-jfosモデル

1. はじめに

大気中の二酸化炭素濃度の上昇を抑制し地球温暖化傾向を緩和するため、炭素吸収源としての森林生態系の役割が期待されている。二酸化炭素排出削減を目的とする気候変動枠組み条約および京都議定書では、地上部、地下部の植物バイオマスだけでなく、リターと枯死木(枯死有機物)

と土壌の炭素プールについても蓄積量とその変化量を算定し、5つのプールを分けて報告することを求めている。炭素量の算定はIPCC GuidelineやGood Practice Guidance（以下GPG）（2004）に基づき実施され、基礎データのない国にはデフォルト値が用意されているが、各国独自の調査やデータの集計により推定精度の向上が推奨されている。

京都議定書では管理された森林における二酸化炭素の吸収分をカウントできる。ただし伐採や間伐などの森林施業は土壌や枯死有機物の炭素動態に影響を与えるので、議定書報告には施業の影響を考慮する必要がある。また土壌有機物の分解や蓄積は気候や樹種の違いも影響する。このような環境の違いや森林管理に伴う枯死木・リター・土壌の炭素蓄積量の変化を予測するにはモデルの利用が有効であり、GPGでも各国の実態にあったモデルの開発や利用が推奨されている。日本は二酸化炭素削減にあたり、1300万トンもの森林吸収分の利用が許されているので、上記5つの炭素プールの推定は正確な手法が要求される。二酸化炭素排出の可能性のある枯死有機物や土壌の炭素蓄積量とその変化を予測するモデルの開発は急務である。

2. 研究目的

本課題の目的は、わが国が気候変動枠組み条約や京都議定書に対応できるよう、1) 必要な土壌や枯死有機物の炭素量とその変化に関する基礎データを集計すること、2) 森林施業に起因する土壌炭素・枯死有機物変動を評価できるモデルを開発することである。

3. 研究方法

(1) 日本の土壌および枯死有機物の炭素量

我が国の土壌や枯死有機物の炭素蓄積量を集計するため、論文や土壌調査報告などからデータを抽出する。国土数値情報など分布データを利用し、樹種と土壌分布の重ね合わせにより樹種別に土壌と枯死有機物の炭素蓄積量を集計するとともに、京都議定書の集計単位である都道府県別に炭素蓄積量を求める。

(2) リターの分解に伴う有機組成の変化と難分解性有機物の蓄積

既報文献からリターおよび枯死木の分解速度を集計する。ブナ落葉の分解試験を行い、分解に伴う落葉中の炭素、窒素含量（乾式燃焼法）、エタノール・ベンゼン可溶性、ホロセルロース、リグニン画分の各濃度（Klason法）、リグニン構成成分の濃度（アルカリ性ニトロベンゼン酸化分解法）変化を測定する。ブナと比較するためアカマツ落葉の分解に伴う有機組成の変化を分析し、有機物分解の難易と成分の関係を解析し、モデルに適用する。

(3) CENTURYモデルの改良とCENTURY-jfosの作成

1990年代の森林施業履歴のデータに基づき日本の森林におけるリターと枯死木の炭素変動を試算し、土壌や枯死有機物の変化を検討する。諸外国で実績のあるRothC（英国）とCENTURY（米国）モデルを評価するため、日本の新規植林に伴う土壌炭素実測例を対象とし、両モデルの適合性を比較する。CENTURYモデルの樹木成長パラメータを調整するとともに、間伐等の施業が土壌へ与える影響を検討する。さらにCENTURYの日本への適応具合をより高めるため、開発者であるコロラド大学のParton教授とOjima教授から助言を得る。メッシュ気候値、土壌や植生分布を利用し、モデルを日本の森林に適用し、実測値に合うよう改良する。京都議定書における報告にモデルを利用する方法を確立する。

4. 結果・考察

(1) 日本の土壌および枯死有機物の炭素量

既報の土壌調査資料集計から、日本の森林土壌（0-30cm）の炭素密度は 3.9kg/m^2 （未熟土）～ 17.2kg/m^2 （泥炭土）、分布面積を考慮した加重平均値は 9.0kg/m^2 であることがわかった（図1）。これをもとに土壌型と森林分布面積から日本の森林セクターにおける土壌炭素蓄積量は約21億炭素トン（ $2180\pm 50\text{Mg}$ ）と計算された。またリターは1.7億トンと計算されたが、枯死木については調査例が非常に少なく基礎情報が不十分であった。土壌炭素蓄積は土壌型や樹種分布の地域による違いを反映し、都道府県により異なった。火山灰の影響をうけた黒色土の分布割合が大きな九州や関東、東北、または高山性土壌分布する中部地方で炭素の蓄積が多く、未熟土の分布割合が大きな近畿や中国地方では蓄積が少なかった（図2）。県別の土壌炭素蓄積量はCENTURYモデルのパラメータとして利用した。

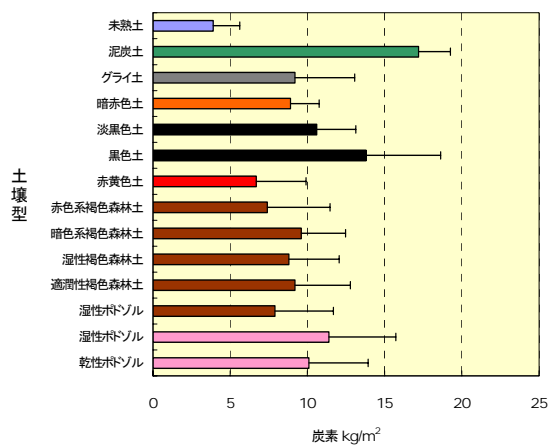


図1 日本の土壌型毎の炭素蓄積量
平均値と標準偏差

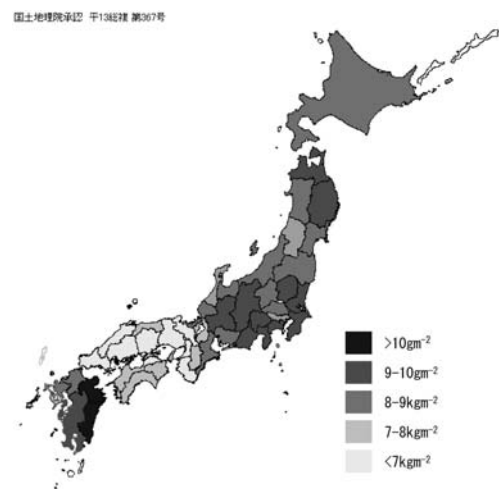


図2 人工林における土壌炭素蓄積量
の都道府県別地域差

日本の集計結果を温帯の欧米諸国と比べると、日本の場合リターの炭素蓄積量が小さく、土壌の蓄積量は大きい傾向があった。またこれらの炭素プールの重要性を蓄積量の大きさから判断すると土壌>枯死木>リターであり、有機物の分解速度から判断するとリター>枯死木>土壌の順になる。枯死木は蓄積量も分解速度もある程度大きいので重要なプールと判断できる。

続いて、1990年代の伐採量統計に基づいて森林の土壌や枯死有機物の炭素変動を検討したところ、伐採面積は1990年代当初の26万haから2000年には7万haまで減少し、伐採に伴う土壌や枯死有機物からの排出量も減少し続けた。主要造林樹種のスギやヒノキ林のリター量の変動は小さいが、林地に残される枝条や根株などの枯死木プールの変動が大きいので、施業の影響を評価する上で枯死木の蓄積変化が重要であることがわかった。また近年、若齢林では間伐木を現場に残すことも多く（切り捨て間伐）、その影響も考慮する必要がある。

(2) リターの分解に伴う有機組成の変化と難分解性有機物の蓄積

リターおよび枯死木の分解試験の結果に指数モデル $W_t = W_0 \exp(-kt)$ （ここで W_0 は初期の重量、

tは時間、Wtは時間t経過後の重量、kは分解定数（/年）を適用し、その分解定数（/年）を比較した。既報文献のレビューによると広葉樹落葉の平均的な分解定数は0.5以上であり、スギやヒノキなどの針葉樹は0.3程度と低く、一般には広葉樹の方が分解は速かった。

リターなどの有機物の分解を支配する要因を検討するため、分解に伴う有機成分の変化を調べた。リターバッグを用いたブナとアカマツ落葉の分解試験によると、どちらも同じよう速度で指数関数的に分解し、36ヶ月後にはおおよそ60%が消失した。有機成分の変化を見ると、可溶性成分（extractives）は試験開始後6ヶ月までに急激に減少したが、ホロセルロース（holocellulose）、リグニン（lignin）画分は試験期間を通じて徐々に減少した。可溶性成分、ホロセルロース、リグニンの画分ごとに分解モデルをあてはめると、ブナでは、それぞれの分解定数kは0.48、0.35、0.30、アカマツでは0.24、0.37、0.5となった。

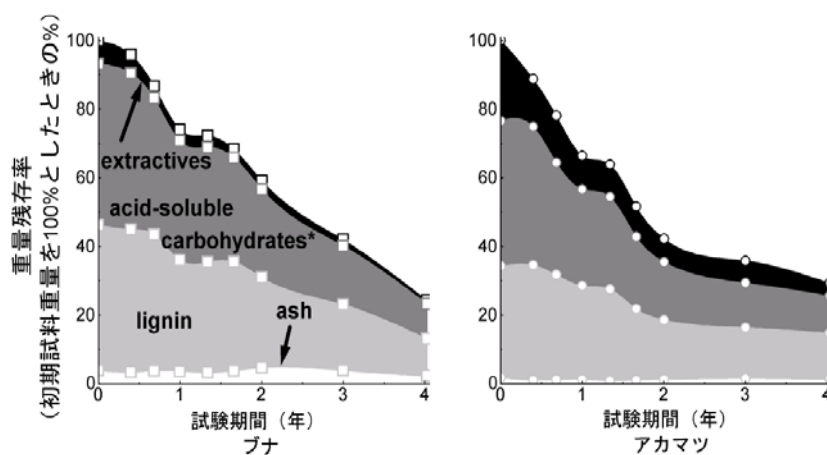


図3 ブナとアカマツの落葉分解に伴う有機成分の変化
(左図：ブナ、右図：アカマツ)

この分解定数とCENTURYモデルの各有機物コンパートメントの分解速度との関係を比較すると、モデルで用いられる structural C画分の分解定数は日本の気候条件下では0.3程度に相当しており、リグニンやホロセルロースの分解定数に近かった。一方、同モデルでもっとも分解しやすい metabolic C画分の分解定数kは14.6と

非常に大きく、1年以内に分解される成分である。上記有機成分分析で最も分解しやすい「可溶性成分」のkはそれよりかなり小さく、近似的な有機成分分析では確認できなかった。有機物の複雑な分解過程は未解明な点が多く、有機化学成分の変化のみから分解を予測するには限界がある。

さらに落葉中の窒素濃度も有機物分解に影響する要因であり、リグニン/窒素比（比が大きいほど分解が遅い）がしばしば分解速度の指標として利用される。本研究で用いたブナとアカマツでその日を比較すると、前者は24、後者は57と大きく異なっていたが、両者の分解速度はほぼ同じなので、リグニン/窒素比は針葉樹と広葉樹共通の指標とはならなかった。落葉中の窒素成分を調べると、分解に伴いタンパクなどを含む酸可溶性窒素が増加しており、微生物による窒素の取り込みが窒素の多いブナ落葉のリグニンの分解を遅くしている可能性が考えられた。

(3) CENTURYモデルの改良とCENTURY-jfosの作成

条約や議定書報告でモデルを利用する場合、そのモデルが国際的に評価をうけていることが必要である。国際的な信頼性と開発時間の制約を考慮し、欧米で開発された著名な2つのモデルからCENTURYとRothCモデルを比較し、日本の森林への適合度や枯死木やリタープール扱いに優れるCENTURYを選択した。CENTURYモデルは米国コロラド州立大のDr. Partonらにより1983年に植物-生態系モデルとして発表され、その後改良されてきた。当初は草地生態系モデルであったが (Parton et al. 1987)、森林や耕地にも拡張され、多くの生態系に適用されており、既に世界的評価が確

立している。WEB上でダウンロードできるが、モデルの利用にあたり開発者から直接助言を得つつ、改良を進めた。モデルの調整には上記の（１）や（２）の成果や細根枯死量など土壌関連のパラメータ、気候メッシュ値などを利用した。またCENTURYモデルは植物の成長モデルも内包しているので、実測値や収穫表を利用し、樹木のバイオマスも併せて調整した（図４）。CENTURYモデルは地上部の部位別バイオマスも十分表現できることがわかった。

モデルの調整は次の点を考慮した。１）議定書報告は都道府県別、森林簿の主要樹種別に集計されるので、CENTURYモデルも都道府県別、主要樹種別に調整した。２）モデルの気象条件は各県の主要樹種分布別に気候メッシュ値から抽出した。３）土壌の炭素蓄積量は都道府県別異なるので、県別に樹種毎に求めた。その推定にあたり樹種と土壌型別の分布および土壌型別の炭素蓄積量を用いた。４）CENTURYモデルを2700～2950年動かし動的平衡状態に調整後、対象樹種に合わせた。５）樹木の成長は収穫表と拡大係数による樹木バイオマス推定結果に適合させた。以上のような調整を経たCENTURYモデルを「CENTURY-jfos (CENTURY model for Japanese forest soil)」と命名した。

CENTURY-jfosを用い、京都議定書3条3項、3条4項が適用される森林管理下における枯死木・リター・土壌の炭素蓄積量とその変化を推定した。施業については間伐周期、間伐材の利用の有無が土壌炭素プールに及ぼす影響を検討した（図５）。

CENTURY-jfosによる枯死木・リター・土壌の炭素量推定は、地上部バイオマス、地下部バイオマスの推定手順、土地利用の変遷、行政の利便性を考慮し、都道府県、樹種、森林管理別にパラメータを調整し、269パターン出力結果を用意した。

この結果を用いて森林の単位面積あたりの枯死木・リター・土壌の炭素ストックとその変化が推定され、森林簿による面積情報を乗ずることで、京都議定書報告における森林吸収源の報告が完成した（図６）。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

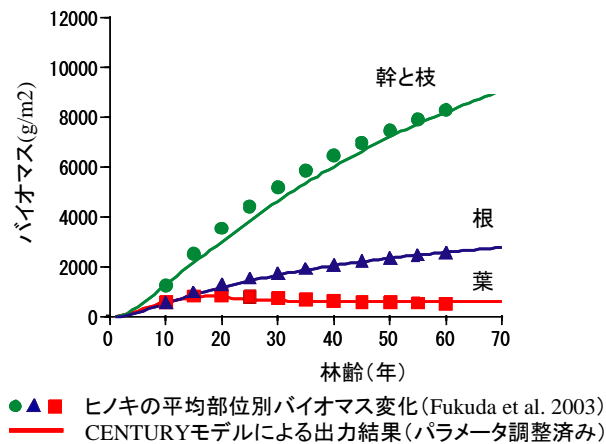


図４ ヒノキ人工林の成長に伴うバイオマス変化とCENTURYモデルによる結果の比較

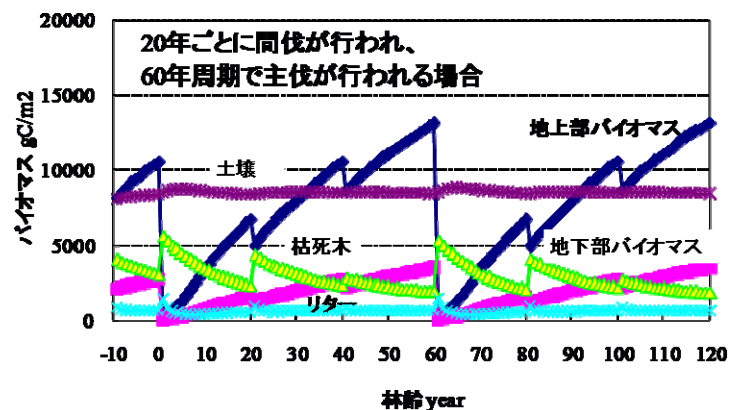


図５ CENTURY-jfosモデルによる森林施業時のバイオマス、枯死木、リター、土壌炭素ストックの変化の例

- 1) 土壌調査報告などを整理集計し、日本の森林土壌の土壌型別炭素蓄積量のデフォルト値が得られた。また都道府県別に、人工林下の土壌の炭素蓄積量を明らかにした。
 - 2) リターや枯死木の蓄積量と分解速度について既報のデータを集約整理した。
 - 3) ブナとアカマツ落葉の分解に伴う有機成分の変化を調べ、土壌炭素モデルのコンパートメントとの対応を検討した。リグニンとホロセルロースの分解はCENTURYモデルのstructural Cの分解速度に対応し、分解を支配する主要な成分であることを確認した。
 - 4) 林業統計から1990年代の皆伐が土壌や枯死有機物に与える影響を検討し、リターや土壌に比べ枯死木の蓄積や分解による影響が大きいことを示した。
 - 5) CENTURYモデルを基に日本の森林の気候条件、土壌条件、樹種特性に合わせたCENTURY-jfosを開発し、伐採や間伐などの森林管理が枯死木・リター・土壌の炭素ストックに与える影響を明らかにした。
- (2) 地球環境政策への貢献
- 1) 京都議定書および気候変動枠組み条約の国別報告にあたり、森林の枯死木・リター・土壌の3プールの算定に、本プロジェクトで開発したCENTURY-jfosが利用された。これら3プールを含めて報告できた国はわずかであり、わが国が京都議定書や条約を遵守していることを国際的に示すができる。
 - 2) IPCC Emission factor database 評議員、IPCC専門家査読者、温室効果ガス排出量算定方法検討会吸収源分科などで森林土壌の炭素評価や方法の改善に国内外で貢献した。

6. 引用文献

Miki Fukuda, Toshiro Iehara, Mitsuo Matsumoto(2003) , Carbon stock estimates for sugi and hinoki forests in Japan, Forest Ecology and Management 184:1-16

IPCC(2004) Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry, IGES

Parton, W. J., D. S. Schimel, C. V. Cole, and D. S. Ojima. (1987) Analysis of factors controlling soil organic matter levels in Great Plains grasslands. Soil Science Society of America Journal 51:1173-1179.

7. 国際共同研究等の状況

アメリカ合衆国コロラド州立大学のD. Ojima、B. Parton両教授からCENTURYモデルの改良に助言を得た。カナダのCBMモデル開発者のW. Kurz博士ともモデル開発の技術的な議論を行った。

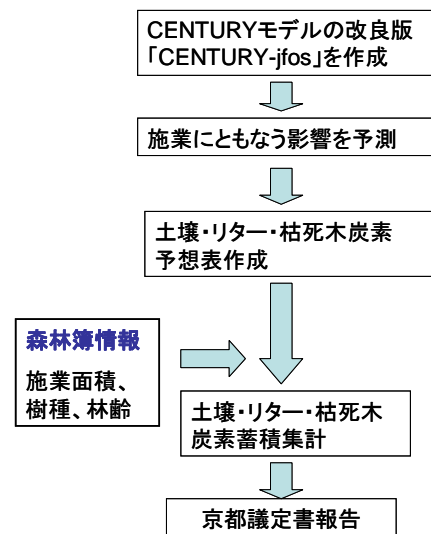


図6 CENTURY-jfosモデルを利用した京都議定書報告の流れ

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) 小野賢二：森林立地、44(2), 63-69 (2002) 「根現存量に影響を及ぼす要因の検討」
- 2) 稲垣善之、深田英久：森林応用研究、12, 7-14 (2003) 「四国地域において森林土壌の炭素貯留量および養分動態に影響を及ぼす要因 I. 」
- 3) K. Ono, M. Hiraide, and M. Amari: Journal of Forest Research., 8, 191-198 (2003) “Determination of lignin, holocellulose, and organic solvent extractives in fresh leaf, litterfall, and organic material on forest floor using near-infrared reflectance spectroscopy”
- 4) Noguchi K, Sakata T, Mizoguchi T, Takahashi M: Journal of Forest Research, 9, 261-264 (2004)、Estimation of the fine root biomass in a Japanese cedar plantation using minirhizotrons.
- 5) K. Morisada, K. Ono, and H. Kanomata: Geoderma, 119, 21-32 (2004) “Organic carbon stock in forest soils in Japan.”
- 6) K. Morisada: Journal of Environmental Information Science, 32, 25-32 (2004) “The organic carbon stock of topsoil and its geographical distribution in Japan”
- 7) M. Takahashi: Journal of Forest Research 10, 239-241 (2005) “Direct estimation of carbon mass of organic layer from dry weight.”
- 8) Noguchi K, Sakata T, Mizoguchi T, Takahashi M: Journal of Forest Research, 10, 435-441 (2005)、Estimating the production and mortality of fine roots in a Japanese cedar (*Cryptomeria japonica* D. Den) plantation using minirhizotron technique.

<その他誌上発表(査読なし)>

- 1) 森貞和仁、小野賢二：日本林学会関東支部大会発表論文集、54, 173-174(2003) 「森林土壌の細土容積重と理化学性との関係について」
- 2) M. Takahashi: Farming Japan, 37-1, 21-26 (2003) “Carbon storage of forest soil and its function”
- 3) 森貞和仁：森をはかる、116-119、古今書院、東京 (2003) 「土壌のCO₂貯留量」
- 4) 森貞和仁、小野賢二、鹿又秀聡、今矢明宏：森林総合研究所平成15年度研究成果選集：28-29(2004) 「日本の森林土壌はどのくらい炭素を貯めているか」
- 5) 森貞和仁：日本林学会関東支部発表論文集、56, 201-202 (2004) 「森林土壌におけるA層の厚さについて」
- 6) 森貞和仁、中岡圭一：日本林学会関東支部大会発表論文集、55, 177-178 (2004) 「土壌炭素定量方法の比較」
- 7) M. Takahashi, H. Sakai, Y. Inagaki, Y. Matsuura, K. Ono, and K. Morisada: Proceedings of workshop on practical national forest inventory systems to meet the requirements of the Kyoto Protocol, p90-97. (2004) “Evaluation of forest soil carbon dynamics in Japan”
- 8) 小野賢二、平出政和、甘利雅弘 (2005)：森林総合研究所平成16年度研究成果選集 14-15、

森林の有機物成分の簡単なはかり方ー近赤外分光分析法ー

- 9) 森貞和仁：日本森林学会関東支部大会論文集，57, 175-177 (2006) 「森林土壌における炭素貯留量の経年変化」
- 10) 小野賢二、荒木誠：日本森林学会関東支部大会論文集，57, 179-181 (2006) 「リター分解に及ぼす灰分含量の影響」

(2) 口頭発表 (学会)

- 1) 高橋正通、田中永晴、酒井寿夫、酒井佳美、稲垣善之、小野賢二、森貞和仁、矢野雅人：日本土壌肥料学講演要旨集, 49, p. 12 (2003) 「日本の森林伐採に伴う枯死有機物・土壌炭素変動」
- 2) 高橋正通：農業環境工学関連5学会2003年合同大会，394-395 (2003) 「森林の管理と森林土壌の炭素蓄積ー土壌炭素モデルの適用例ー」
- 3) 小野賢二、稲垣善之、長谷川元洋、杉元倫子、平出政和：日本林学会大会学術講演集115:519 (2004) 「落葉、堆積有機物、および土壌試料におけるリグニン芳香核構造の定量手法の検討」
- 4) 小野賢二、長谷川元洋、平出政和、杉元倫子、稲垣善之、高橋正通：第116回日本林学会大会要旨集 (2004) 「小川学術参考林にて行った4年間のリター分解試験におけるブナおよびアカマツ落葉中のリグニンと多糖類の動態」
- 5) Takahashi M, Sakai H, Inagaki Y, Matsuura Y, Ono K, Morisada K 'Worship on practical national forest inventory systems to meet the requirements of the Kyoto Protocol, 15-16 Nov. 2004, 2004
- 6) Morisada K, Ohno Y, Sawata T, Katakura M, Yoshioka M, Nakaoka H, Takamiya T: International Symposium-Forest soils under global and local changes: from research to practice, Bordeaux, (2004), " Spatial variability of organic carbon stock in topsoil of forest soil in Japan"
- 7) Sakai H, Inagaki M, Noguchi K, Sakata T, Takahashi M, Yatskov, M. A.: *ibid.*, (2004) " Changes in soil organic carbon and nitrogen following afforestation of *Cryptomeria japonica* and *Chamaecyparis obtusa* on Andisols in central Japan."
- 8) 稲垣善之、深田英久：日本土壌肥料学会大会講演要旨集 51: 201 (2005) 「降水量の異なるスギとヒノキ林における材と葉の初期分解速度」
- 9) 稲垣善之、倉本恵生：日本森林学会関西支部大会研究発表要旨集 56: 32 (2005) 「暖温帯針広混交林における落葉分解と窒素動態ー斜面位置と植生の影響ー」
- 10) 稲垣善之、高橋正通、阪田匡司、酒井佳美、池田重人、金子真司、漢那賢作：日本生態学会大会講演要旨集 53: 269 (2006) 「日本列島の温度傾度に対するスギ・ヒノキ材の重量減少と窒素動態」
- 11) 小野賢二、平出政和、長谷川元洋、高橋正通：第53回日本生態学会大会講演要旨集194 (2006) 「ブナおよびアカマツの落葉分解過程における窒素およびタンパク質の動態」
- 12) 酒井寿夫、森沢猛、溝口岳男、西山嘉彦、森貞和仁：日本林学会大会学術講演集117:736 (2006) 「御岳岩屑流堆積地における緑化植林後17年目の土壌炭素・窒素貯留量」
- 13) 高橋正通、石塚成宏、酒井寿夫、酒井佳美、稲垣善之、小野賢二、森貞和仁、松本光朗：日本林学会大会学術講演集117:p736 (2006) 「京都議定書に向けた森林の土壌および枯死有機

物炭素ストックの推定方法」

(3) 出願特許

なし

(4) シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

なし

(5) マスコミ等への公表・報道等

なし